

辐射制冷器污染问题的实验研究

王 维 扬

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文对辐射制冷器在性能检测和红外辐射定标试验过程中所受到的污染情况作了详细的实验研究,并对这些问题进行了分析和讨论,提出了解决的方法。

一、引 言

星载红外探测仪器广泛使用了辐射制冷器。辐射制冷器本身既是一种被动式的冷却装置,又是一种按镜面成像技术设计的“光学”仪器。其按照严格要求加工成型的光学表面很容易受到污染。本文仅从辐射制冷器在它的性能检测和地面红外系统定标过程中可能受到的污染情况作了初步研究和实验分析。

二、污染发生的原因

辐射制冷器是一种被动式制冷装置。如果辐射制冷器的性能检测和红外辐射定标试验是在模拟太空条件的有油真空系统内进行的,由于试验持续时间比较长,在辐冷工作时,它的主要工作表面又一直处于低温状态,因此油扩散泵蒸发的油蒸汽以及仪器本身所带的非金属材料如塑料、涤纶薄膜、尼龙布等释放出来的大量气体、水份和高分子有机物质,极易在辐冷工作表面沉积和滞留。特别在真空系统的起动和停车阶段,辐冷受到污染的几率更大。因为有些真空系统的扩散泵同真空罐的连接不设控制阀门,扩散泵起动时,大量的油分子蒸发后弥散在系统中,使真空度下降,造成污染。在停车阶段由于长时间工作的低温泵(它的抽速可达百万托升/秒)和热沉吸附的大量油分子、水份以及有机物质和高凝固点气体在短时间内迅速释放出来,又来不及为前级泵抽走,充斥于整个真空罐,造成真空度的突然下跌,极易被处于低温状态的辐冷表面捕获,若处理不当就会造成严重返油。

三、污染对辐冷影响的热分析

辐射制冷器的辐射热交换是以镜面成像技术为基础进行热分析的。以二级辐射制冷器

本文1984年12月20日收到。

本文曾在全国第三届微型制冷机学术交流会上宣读。

为例, 它的二级冷块的热平衡方程式可以写成

$$\varepsilon_p \sigma A_p T_p^4 = H_r + H_{sr} + H_R + H_k + H_J + H_0 + H_b,$$

式中 H_r 是从锥体镜面来的辐射热; H_{sr} 是从一级锥体来的辐射热; H_R 是通过多层绝热材料传入的辐射热; H_k 是通过支撑引进的热导; H_J 是来自探测器的焦耳热; H_0 是通过光学孔输入的辐射热; H_b 是来自冷背景的辐射热; A_p 是冷块辐射面积; T_p 为冷块温度, ε_p 为冷块表面的比辐射率; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数。并有:

$$H_r = A_p \sigma \varepsilon_p \left[1 - \sum_0^n (1 - \varepsilon_0)^n F_{p-m(n)} \right] T_c^4,$$

式中 ε_0 为锥体镜面的比辐射率; ε_p 为冷块表面的比辐射率; $F_{p-m(n)}$ 为冷块同所看到的被锥壁几次镜面反射形成的锥口象视因子数值; T_c 为锥壁温度。在无屏蔽时:

$$H_{sr} = \varepsilon_{cp} A'_p \sigma (T_c^4 - T_p^4),$$

式中 A'_p 为冷块背面表面积,

$$\varepsilon_{cp} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon'_p} + \frac{A_p}{A_c} \left(\frac{1}{\varepsilon'_c} - 1 \right)},$$

其中 ε'_p 为二级冷块背面的比辐射率。 ε'_c 为锥体的表面比辐射率, A_p 为冷块参加辐射热交换的面积, A_c 为锥体参加辐射热交换的面积。

由上可以看到辐射制冷器的二级冷块温度同锥体镜面、锥体、冷块背面的比辐射率以及锥体温度有关。它们表面光学性能的变化, 对冷块温度影响较大。

对于锥体的平衡温度, 我们也可以写出类似的方程, 它同本身的比辐射率、地球屏蔽镜面的比辐射率有关。因此在辐射制冷器的

设计和加工过程中, 都对镜面提出了严格的光学要求。污染使辐冷镜面反射率下降, 从而引起冷块温度的升高。

图 1 表明一种辐射制冷器镜面反射率的变化对锥体和冷块温度的影响, 图中 ΔT_p 为冷块温差, ΔT_c 为锥体温差。

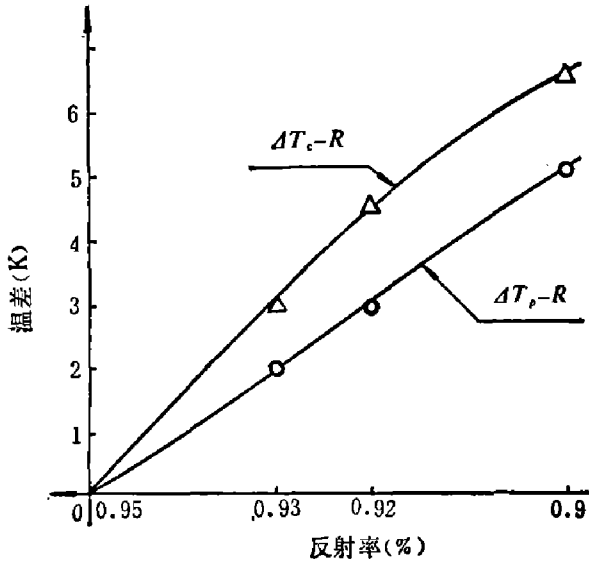


图 1 不同反射率时一级和二级温度的变化

Fig. 1 Variation of temperature of first stage and second stage at different reflectivity

四、污染程度的实验测量和分布

在十几次反复试验过程中, 我们摸索到一套控制、减少污染的有效方法。除了严格遵循有关扩散泵开机、停机操作程序之外, 还对辐冷的主要工作表面采取了加热放气、温差控制、屏蔽、设置捕获冷阱等方法, 有效地控制了污染。

表 1 和表 2 示出在热真空试验中, 未加污染控制时镜面反射率的下降情况。表 1 为镀金表面, 表 2 为镀铝表面。

污染使镀金表面的反射率在红外波段下降 2~3%, 镀铝表面反射率下降 3~13% 左右。

表 1 镀金表面试验前后反射率的变化(%)

Table 1 Change of reflectivity before and after experiment for gold-plated surface

波长(μm)	0.65	0.8	1	3	5	7	9	11	13	14
性能试验前	52.1	61.9	67.6	90.6	94.4	95.3	95.7	95.8	95.7	95.6
性能试验后	50.68	60.60	66.27	88.74	92.29	93.30	93.69	93.75	93.49	93.05

表 2 镀铝表面试验前后反射率的变化(%)

Table 2 Change of reflectivity before and after experiment for alluminum-plated surface

波长(μm)	0.65	0.8	1	3	5	7	9	11	13	14
性能试验前	81.73	70.76	88.05	87.31	96.90	97.93	95.29	96.20	97.40	97.28
性能试验后	68.46	67.94	73.12	78.73	89.89	92.08	88.23	93.53	94.97	94.95

采取了防污染措施后,情况大为改善。表 3 表明用 KM-1 设备作性能检测时,采取防污染措施后镀铝镜面反射率变化情况,除了在可见光部分略有下降外,在 0.8、3、10 μm 处还略有上升。

表 3 采取防污染措施后反射率的变化(%)

Table 3 Change of reflectivity after taking precautions against pollution

波长(μm)	0.65	0.8	1	3	5	7	9	11	13	14
性能试验前	83.53	74.97	92.55	85.69	97.03	97.77	94.99	95.93	97.03	96.86
性能试验后	85.64	76.23	93.20	87.39	97.01	97.51	94.40	95.88	96.69	96.57

我们在航天部大型空间模拟设备中进行红外系统定标试验时,采取了严格的防污染措施,镀铝镜面反射率变化情况类似表 3。

对于一个辐射制冷器来说,除了性能检测之外,还必须在进行红外系统的定标后才能投入使用。表 4 为参加性能检测和定标试验后镀铝表面反射率随波长变化情况,由于严格

表 4 经两次试验采取防污染措施后反射率的变化(%)

Table 4 Change of reflectivity after two times of experiments and after taking precautions against pollution

波长(μm)	0.65	0.8	1	3	5	7	9	11	13	14
试验前	86.46	75.91	92.42	88.03	97.38	98.23	95.58	96.45	97.58	97.43
性能试验后	85.65	75.93	93.25	88.67	97.27	97.86	94.75	96.20	97.04	96.94
定标试验后	85.01	77.07	93.95	89.99	97.41	97.92	94.59	96.43	97.09	97.02

控制了污染,其变化情况类同于表 3,但可以看出累积影响要比一次试验影响稍大。

在试验过程中虽然对制冷器作了严格污染控制,但仍难免受到沾污,有时要进行清洗。表 5 示出了经两次试验又经两次恰当清洗后镜面反射率的变化情况,表明只要方法得当,总的来说影响不大。

表 5 经两次试验、两次清洗后反射率的变化(%)
Table 5 Change of reflectivity after two times
of experiments and rinse

波长(μm)	0.65	0.8	1	3	5	7	9	11	13	14
试验前	86.53	74.97	92.55	85.69	97.03	97.77	94.99	95.93	97.03	96.86
性能试验后	86.50	77.01	93.56	87.17	97.89	98.50	95.39	96.93	97.67	97.38
第一次擦洗后	85.82	76.15	92.70	86.49	96.84	97.52	94.57	95.90	96.77	96.57
第二次试验后	85.64	76.03	93.20	87.39	97.01	97.51	94.40	95.88	96.69	96.57
第二次擦洗后	85.55	76.31	93.14	87.37	97.07	97.62	94.50	95.97	96.72	96.60

在试验中我们还发现,受污染的程度同仪器在真空罐内的位置有密切关系。对于可能受污的部件进行屏蔽,亦可收到控制污染的效果。需要说明的是:自身屏蔽方法对于内部包含有机物等放气气源(亦是污染源)、又要求有宽敞的放气通道才能正常工作的辐射制冷器来说,不是最适当的。

我们还试验了样品两种测量位置的影响。由于被测的铝镜是经过严格研磨、抛光的,因此影响不大。其结果列于表 6。

表 6 不同位置时测得的铝镜反射率(%)
Table 6 Reflectivity of Al mirror measured at different positions

波长(μm) 位置	1	2	3	4	8	10	11
0°	93.20	93.66	85.74	96.01	97.44	90.39	95.71
转动 45°	93.21	93.56	85.70	96.13	97.41	90.36	95.73
转动 90°	93.19	93.62	85.72		97.43		95.84

反射率用本所物理室研制的 JF-1 型红外高反射率测量仪测量,最大误差为 0.13%,最小误差为 0.02%,均在仪器的误差范围内。

五、油污染对镜面反射率影响的理论分析

在真空容器中 Si 油分子在镜面上的沉积犹如真空镀膜一样,在镜子的表面形成了一层“光学”薄膜(在分析时忽略其他杂质的影响)。它对镜面反射率的影响可借助薄膜光学理论进行计算分析。

根据薄膜理论,多层膜系的反射率和透射率的单一精确表达式是非常复杂的,我们只讨

论垂直入射的情况。

1. 对于纯金属膜, 其反射率可由下式计算:

$$R = \frac{(1-n)^2 + K^2}{(1+n)^2 + K^2},$$

式中 n 、 K 均为金属的光学常数。对于镀铝反射镜, 在 $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ 时, 有 $n = 1.30$ 、 $K = 7.11$, 算得 $R = 89.29\%$ 。

2. 对于表面镀有膜层的反射镜, 我们可以应用矩阵方法来计算反射率和透射率。在这里用菲涅尔系数表示结果是方便的, 一般说来菲涅尔系数为复数。第 m 层界面上系数为

$$\begin{aligned} r_m &= g_m + ih_m, \\ t_m &= 1 + g_m + ih_m. \end{aligned}$$

若第 m 层或 $m-1$ 层均为吸收媒质, 则有

$$n_{m-1} = n_{m-1} - ik_{m-1} \quad \text{和} \quad n_m = n_m - ik_m.$$

在垂直入射时有:

$$\begin{aligned} g_m &= \frac{n_{m-1}^2 + k_{m-1}^2 - n_m^2 - k_m^2}{(n_{m-1} + n_m)^2 + (k_{m-1} + k_m)^2}, \\ h_m &= \frac{2(n_{m-1}k_m - n_mk_{m-1})}{(n_{m-1} + n_m)^2 + (k_{m-1} + k_m)^2}. \end{aligned}$$

若第 $(m-1)$ 层的实测厚度为 d_{m-1} , 则第 m 个矩阵中相位项 $e^{i\delta_{m-1}}$ 便可写为

$$\exp i\delta_{m-1} = \exp \frac{i2\pi}{\lambda} (n_{m-1} - ik_{m-1})d_{m-1} = \exp \alpha_{m-1} \exp i\gamma_{m-1}.$$

这里 $\alpha_m = \frac{2\pi}{\lambda} k_{m-1}d_{m-1}$, $\gamma_{m-1} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{m-1}d_{m-1}$, λ 为 λ 射光波长。

第 m 个矩阵为:

$$(O_m) = \begin{pmatrix} P_m + iq_m & r_m + is_m \\ t_m + iu_m & v_m + iw_m \end{pmatrix}.$$

具体推导过程可参阅文献[7]第四章, 这里只给出了最后的计算式。

我们只讨论两层膜的情况: 在折射率为 $n_3 = n_3 - ik_3$ 的衬底上, 镀有折射率为 $n_1 = n_1 - ik_1$ 和 $n_2 = n_2 - ik_2$, 厚度各为 d_1 、 d_2 的膜层。镀有 SiO 保护膜的铝反射镜属于单层膜问题, 它对波长 λ 的反射率为

$$R_1 = \frac{t_{12}^2 + u_{12}^2}{p_{12}^2 + q_{12}^2},$$

在 $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ 时, $d_1 = 0.15 \mu\text{m}$ 、 $n_1 = 1.9$ 、 $k_1 = 0$, 算得 $R_1 = 87.01\%$ 。

经油污以后, 形成双层的复合膜, 对波长 λ 的反射率为

$$R_2 = \frac{t_{13}^2 + u_{13}^2}{p_{13}^2 + q_{13}^2},$$

在 $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ 时, $d_2 = 0.15 \mu\text{m}$ 、 $n_2 = 1.5$ 、 $k_2 = 0$, 算得 $R_2 = 84.84\%$ 。

油污后的反射率同镀有 SiO 保护膜的铝镜相比, 下降了 2.17%, 这个变化同我们实际测得的数据是比较接近的。油污后在可见波段一般有明显的下降(如表 2), 经过严格污染控制后可以大大减轻其影响。在比膜厚度较大的红外波段则可以控制在 $<1\%$ 的程度。

六、结 论

1. 辐射制冷器的污染及控制问题在它的整个研制、运行过程中,都必须加以严密注意和认真解决。污染的程度应作为可靠性和寿命的一个指标。在辐射制冷器的每次试验中,都应对试验过程中可能存在的污染情况作出检测,并在试验结束后提出报告,作为确认试验后的制冷器能否投入正式使用的重要依据。

2. 有油超高真空系统可以满足辐射制冷器的性能检测和红外系统定标的基本要求。但在试验时必须严格执行防止污染的措施,才有可能使污染程度达到可以接受的水平。

致谢——感谢龚惠兴、严义勋同志对本工作的指导和帮助,以及陶凤翔、方家熊、朱三根、张守德、杨晓峰等同志、航天部环境模拟试验中心和本组其他同志提供的帮助和协作。

参 考 文 献

- [1] Donohoe M. J., *AIAA Paper*, (1976), 75~84.
- [2] Annable R. V., *Appl. Opt.*, **19**(1970), 185~193.
- [3] Annable R. V., *Appl. Opt.*, **11**(1972), 1949~1501.
- [4] Cox J. T., *Appl. Opt.*, **14**(1975), 1247~1250.
- [5] Cox J. T., *Appl. Opt.*, **17**(1978), 2125~2126.
- [6] Ordal M. A., *Appl. Opt.*, **22**(1983), 1109~1119.
- [7] Heanens O. S., 君树百译, 固体薄膜的光学性质, 国防出版社, 1965.
- [8] 潘栋, 实用光学与光学工程, 爱迪出版社, 香港, 1966.

EXPERIMENTAL STUDIES OF POLLUTION OF RADIANT COOLER

WANG WEIYANG

(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Experimental studies of pollution for radiant cooler during experimental process of performance test and infrared radiation calibration are presented. The problems are analysed and discussed. The ways to solve them are suggested.